中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 1 ~ 6
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





进 展 中国综合地层和时间框架专辑

中国地层学新进展——"中国综合地层和时间框架"专辑前言

沈树忠[1,2*], 戎嘉余[1]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所和生命与环境卓越中心, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
2. 南京大学生物演化与环境科教融合中心, 南京 210023
* E-mail: szshen@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2018-08-24; 收修改稿日期: 2018-09-03; 接受日期: 2018-09-17; 网络版发表日期: 2018-11-30
国家自然科学基金重大项目(批准号: 41290260)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号: 41521061)、国家自然科学基金重点国际合作项目(批准号: 41420104003)、中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB26000000和XDB18000000)和中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: QYZDY-SSW-DQC023)资助

摘要 地质历史时期发生了一系列改变整个地球生物圈演化进程的重大地质和生物事件. 为了解这些事件发生的时间、顺序、速度和原因, 需要在统一的时间框架中进行综合分析. 精准的生物地层是划分地质年代和进行洲际和地区间对比的首选标准. 中国地层类型多种多样, 化石丰富, 传统的以化石门类系统古生物学为基础的生物地层工作发挥了重要的作用, 在已经建立的72个全球界线层型(GSSP)中有11个位于中国, 是目前建立GSSP最多的国家, 在国际地层表中占有一席之地. 高精度定年、化学地层学、天文旋回地层学等也在地层划分和对比中越来越多地应用, 并取得一定进展. 本专辑由中国的地层古生物学专家对中国近十多年以来从埃迪卡拉纪到第四纪综合地层和时间框架方面的进展以及各大区之间的地层划分与对比进行了系统总结.

关键词 生物地层, 化学地层, 全球界线层型(GSSP), 地层对比, 时间框架

时间和空间是物质存在的基础, 没有时间, 就没有速率. 在地质历史时期中, 发生了一系列重大的生物事件(如生物大辐射、大灭绝及其后的复苏等)和环境剧变事件(如大陆重组和大规模火山活动、气候的剧烈波动和全球海平面升降等). 为了解这些事件发生的时间、顺序、速度和原因, 需要在统一的时间框架中进行综合分析. 利用地层记录划分地质历史, 建立统一的年代标准和框架, 解决不同地区的地层对比, 是地质学研究的基础. 国际地层委员会于1965年成立时, 就已清楚地认识到年代地层的划分问题, 将建立全球统一的、精确定义的年代地层和地质年代系列作为其主要工作目标, 逐步建立用"全球界线层型剖面和点位"(GSSP, 俗称"金钉子")来划分地质时间的概念和方法. 这项工作的主要目的是建立国际地层表中101个阶的底界的精确位置和时间. GSSP是构建《全球地质年表》和《国际地层表》的主要元素, 是开展地球生命演化过程及地质事件研究的重要基石和时间标尺. 其方法是: 在显生宙以前(埃迪卡拉纪除外), 通过一个标

中文引用格式: 沈树忠, 戎嘉余. 2019. 中国地层学新进展——"中国综合地层和时间框架"专辑前言. 中国科学: 地球科学, 49: 1–6, doi: 10.1360/N072018-00235
英文引用格式: Shen S Z, Rong J Y. 2019. Preface: New advances in the integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 1–6, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9280-6

准年龄(GSSA)来限定; 而在显生宙, 则大都通过选定一个标准化石为标志, 以其在特定的标准剖面上首次出现的位置来定义. 经过半个世纪的努力, 在101个GSSP中已经有72个被确定, 其中, 在中国建立的GSSP就有11个, 成果显赫. 国际地层委员会曾雄心勃勃, 希望在2008年前完成全部GSSP的确立工作, 并把将来的工作重点转入“后层型”阶段, 即主要解决洲际对比问题. 然而, 随着近年来越来越细致的生物地层学工作和一系列包括高精度年代学、化学地层、磁性地层和天文旋回地层等新技术和新手段的应用, 国际地层委员会各分会和工作组纷纷发现, 原先已确定的不少全球界线层型, 或多或少都需要重新认识. 存在的主要新问题包括: (1) 难于找到任何一个化石的首现点, 甚至有些阶(例如, 志留系的埃隆阶、特列奇阶、申伍德阶和卢德福特阶、二叠系的沃德阶等)的底界标志化石至今无法在GSSP剖面被证实, 用于定义GSSP的标准化石在GSSP剖面的出现位置往往不是真正的“首现”. 随着研究的深入, 原先被认为“首现”的位置实际化石出现的层位更早的例子比比皆是. 志留系的底界GSSP最初用*Parakidograptus acuminatus* 和*Akidograptus ascensus*两个种在苏格兰Dob’s Linn剖面的共同出现点来定义(Cocks, 1985), 然而, 后来的工作发现这两个种在附近的剖面出现的层位并不一致, 导致志留系底界GSSP需要进行重新定义(Rong等, 2008); 后期的研究表明, 石炭系底界的标志化石*Siphonodella sulcata*也比定义GSSP时出现得更早(Kaiser, 2009). (2) 高精度定年技术, 尤其是ID-TIMS定年技术的快速发展以及多种高精度同位素地球化学地层的应用, 使得地层学家们需要重新认识生物地层标定的时间含义. 目前CA-ID-TIMS U-Pb定年技术的最高精度已经达到0.3‰(Schmitz和Kuiper, 2013), 也就是万年级的(例如, Baresel等, 2017; Burgess等, 2014; Shen等, 2018), 这种精度已经超过了化石带可以设别的精度, 而且理论上不会像化石那样常常受到生物迁移、岩相变化和人为采集程度不同等造成的穿时现象的影响. (3) 同位素地球化学地层同样在高精度地层对比中发挥越来越重要的作用, 在排除地方性和后期成岩作用影响的情况下具有重要的全球对比意义(Zhu等, 2013). (4) 利用全球界线层型的概念和生物地层的方法还受到海陆相对比困难、纬度梯度造成生物地理区系发育而导致难于对比等影响. 因此, 国际地层委员会目前要求在建立新的GSSP时, 除生物地层标志以外, 还必须有高精度定年、化学地层、磁性地层、旋回地层等多方面的综合地层研究工作.

尽管如此, 由于化石的普遍存在以及标准化石快速演化, 精准的生物地层仍然是划分地质年代和进行洲际和地区间对比首选标准, 高精度定年、化学地层等都需要在已知可靠的生物地层框架下才能发挥作用. 中国地层类型多种多样, 化石丰富. 传统的以古生物学为基础的生物地层工作, 发挥了重要的作用, 并在国际地层表中占有一席之地, 中国也是目前建立GSSP最多的国家. 然而, 我们也认识到, 在重建地球历史过程中, 特别是在地质年代学领域存在许多不足之处. 如国际地质年表中, 2011年之前还没有一个根据中国地层剖面测定的年龄值. 近几年, 虽然在新元古代晚期(Condon等, 2005)、二叠纪和三叠纪(Burgess等, 2014; Lehrmann等, 2015; Shen等, 2011)等时代发表了以中国剖面为依据的年龄, 但由于种种主客观的原因, 中国实验室在高精度定年方面还达不到国际实验室的条件和标准, 这些年龄都是在国外实验室获得的. 开展化学地层、旋回地层、磁性地层等也是大势所趋, 我们必须适应国际新时代的发展趋势.

组织本专辑的初衷就是在当今地层学发展的一系列新动向下产生的. 国际地层委员会老一届执委会发表了国际地质年表2012(Gradstein等, 2012), 其中, 只有寒武纪一章是由中国学者领衔完成(Peng等, 2012), 而中国学者为许多地质历史时期的综合地层和时间框架研究做出了重要贡献. 因此, 非常有必要对中国近20年来的综合地层学工作进行系统和及时的总结.

本专辑涵盖了从埃迪卡拉纪到第四纪总共13个纪的中国综合地层和时间框架. 除传统而富有新意的生物地层方面的最新成果外, 要求各纪总结需要结合综合地层和时间框架方面的内容和进展, 并包括中国主要板块之间的对比, 以适应国际地层学有关后层型研究的新要求, 为地学其他领域提供一个以中国剖面为主的时间框架. 在总结过程中, 我们发现从老到新、各个时代在地层发育程度、研究深度等方面差异很大. 埃迪卡拉纪由于近年来一系列多细胞宏观生物的发现(如Yuan等, 2011)而处于一个从隐生宙向显生宙的关键转折期(陈均远, 2004; Zhu等, 2007; 沈树忠等, 2010; Xiao等, 2016). 由于该时期宏观生物较少, 化石普遍具有地方性特色, 分布局限且鉴定难度很大, 含化

石的层位时代难于精确厘定, 因此, 提出采用碳同位素变化和化石相结合等方法进行划分和对比(周传明等, 2019).

寒武纪是显生宙的第一个纪, 现代生态系统中的绝大部分门类生物当时已经出现(陈均远, 2004; Shu, 2008; Erwin等, 2011), 标志着地球从微生物为主导的前寒武纪生态系统向以动物、微生物和陆生植物共同主导的显生宙生态系统的转变. 在现有的各阶中, 古丈阶、排碧阶、江山阶、乌溜阶底界的GSSP均建立在华南. 另外, 第十阶底界的GSSP也已经在华南建立, 等待国际地科联最后批准. 但是, 全球寒武系下部年代地层的建阶和对比工作却遇到了很大的困难, 单一地层学手段显然无法解决问题, 应用多种地层学方法在全球不同地区同时开展综合地层研究才是有效的途径(朱茂炎等, 2019). 奥陶纪早、中期见证了地球生态系统的全面复杂化, 而晚期又经历了第一次生物大灭绝和大冰期的发育和消融过程(戎嘉余和黄冰, 2014). 一个高精度的综合地层和时间框架对于了解这些生物和环境事件的原因特别重要. 国际奥陶系采用“三统七阶”的标准划分方案, 这七个阶的底界GSSP都已全部确立, 其中大坪阶、达瑞威尔阶和赫南特阶底界的三个“金钉子”在中国建立. 中国奥陶纪的生物地层框架分辨率高, 在油气资源的勘探中发挥了重要作用(陈旭等, 2017). 但中国奥陶纪的同位素年龄值匮乏, 华南上奥陶统含有丰富的斑脱岩层, 亟待开展同位素测年工作(张元动等, 2019). 志留纪仅经历约25Ma, 是一个非常特殊的地质时期, 记录了奥陶纪大灭绝后生物多样性的快速复苏, 大陆板块聚合分离, 气候多变, 海平面升降频繁, 植被开始占领陆地(Kenrick和Crane, 1997), 在华南记录了早期有颌鱼类的大发展(赵文金和朱敏, 2014)等重大事件信息. 华南志留系研究历史最悠久, 但是, 广西运动(陈旭等, 2014)导致志留系主要发育兰多维列统, 往上沉积间断频繁发生, 缺失许多地层. 志留系在华北台地上基本缺失, 唯北部边缘发育罗德洛和普里道利统. 因各地化石组合零星且分散, 连续生物带序列未能建立, 化学地层学信息不全, 同位素测年基本空白, 还需深化研究(戎嘉余等, 2019).

早古生代以三叶虫、笔石等为主导门类化石划分地层的时代到了晚古生代已经被牙形类、蜓类、菊石类等所取代. 国际泥盆系标准年代地层单位7个阶底界的GSSP于1996年已全部确立, 目前的主要任务集中在对已经确立的GSSP进行精细化研究. 由于各阶的时间长度差异很大, 很多阶的时限很长, 国际泥盆纪地层分会已经开始着手亚阶的再分工作, 迫切需要开展后层型综合地层对比研究, 其中就包括泥盆系-石炭系界线GSSP的重新修订问题(Becker等, 2012; Kaiser, 2009), 并在中国桂林建立了泥盆系-石炭系界线辅助剖面(Yu, 1988). 由于下、中泥盆统在很多地区缺失, 中国泥盆纪地层研究多集中在泥盆纪晚期F/F大灭绝事件的弗拉阶-法门阶界线附近(Ma等, 2016), 也没有建立连续而完整的泥盆纪同位素曲线; 除华南地区在20世纪后期做了一些工作以外, 其他地区的泥盆纪综合地层研究程度较低, 有待进一步加强(郄文昆等, 2019). 石炭纪由于发生了与当今地球正在经历的第四纪冰期相似的晚古生代大冰期而备受关注. 但迄今为止, 整个石炭系仅有3个阶底界的GSSP已被确定. 中国近些年来在华南地区开展了大量详细的生物地层工作, 建立了较为可靠的综合地层框架, 与全球其他地区的相比达到了一个新水平, 有望为建立全球地层框架作出贡献, 但尚无可靠的同位素测年数据(王向东等, 2019). 二叠纪是古生代最后一个纪, 发生了多个重大生物和地质事件(包括早期的冰期事件, 前乐平统生物灭绝事件、峨眉山玄武岩喷发和二叠纪末生物大灭绝事件等)而研究程度较高. 泛大陆(Pangea)的聚合在二叠纪达到了顶峰时期, 以瓜达鲁普世晚期伊拉瓦拉(Illawarra)反转为标志, 构造域由南北向会聚逐渐转入东西向裂解阶段(Isozaki, 2009), 并导致大规模火山喷发, 锶同位素值一度降到了古生代的最低点(Wang等, 2018); 与此同时, 二叠纪海陆环境发生了剧烈变化, 并最终导致二叠纪末发生了地质历史时期最大的生物灭绝事件(陈军和徐义刚, 2017; 沈树忠和张华, 2017; 沈树忠等, 2019).

进入中生代以后, 三叠纪早期华南地区海相地层相当发育, 化石丰富, 但比较单调, 菊石和牙形类是划分地层的主要化石门类. 近年来国际三叠纪海相年代地层学研究, 尤其是GSSP的工作进展比较缓慢, 但华南海相生物地层、化学地层以及高精度测年由于涉及生物大灭绝以后的复苏均取得了重要进展(Ovtcharova等, 2006; Tong等, 2007; Lehrmann等, 2015). 与此同时, 华北则以陆相山间盆地沉积为主, 发育了一套红色砂岩为主的沉积, 化石稀少, 对比难度很大. 华南地区中三叠世以后也转入以陆相沉积为主的格局, 从此, 中国

海相沉积仅限于西藏、华南南部和东北等少数地区(童金南等, 2019). 中国侏罗系以陆相地层为主, 燕山运动对中国东部及北方地区产生深远影响, 形成多个重要的区域性不整合面, 生物地层和同位素年代学的划分和对比分歧很大, 高精度同位素年代学研究将对于解决中国陆相侏罗系的对比具有重要意义. 中国陆相侏罗系整体特征是由早中侏罗世温暖湿润的成煤环境向晚侏罗世后期炎热干旱的红层转变(黄迪颖等, 2018). 中国白垩纪的古地理格局基本继承了侏罗纪的特点, 但白垩纪由于发生了一系列大洋缺氧事件, 并发育大洋红层(Wang等, 2011), 因其与古气候和古海洋变化的紧密关系, 已经成为国际白垩纪研究中的热点(王成善和胡修棉, 2005), 陆相沉积在中西部以河湖相红色碎屑岩为主, 在东部火山活动带由中酸性火山岩与碎屑岩共生, 以冀北-辽西地区和松辽盆地发育最为完整, 保存了世界著名的热河生物群(张弥曼等, 2001; Zhou, 2014)、松花江生物群、不同时期的恐龙动物群等丰富的白垩纪陆相生物化石群, 也记录了燕山运动、东部火山喷发等一系列地质事件, 因此, 加强上述事件在时空上的分布和横向上的对比研究, 使其从区域到洲际对比, 有特别重要的科学意义(席党鹏等, 2019).

白垩纪末由于一颗行星撞击地球导致恐龙等大量生物灭绝的假说在广大民众中非常流行, 但这次撞击事件在中国却缺乏系统研究, 也没有可靠记录, 但生物更替明显. 白垩纪末由于陆生恐龙、翼龙和海生的菊石、鱼龙等动物类群灭绝等导致古近纪动物群以崭新的面貌出现在地球上. 在古新世与始新世之交又发生了一次影响全球的快速升温事件(PETM事件), 这次事件快速短暂(~15万年)、增温较大(>5℃)、底栖生物灭绝、灵长类出现及辐射、碳同位素负漂等(Gingerich, 2006), 受到许多中国学者的关注(Zhang等, 2017). 古近纪除了始新统巴顿阶和普里亚本阶之外, 其余各阶的全球标准层型剖面和点位(GSSP)都已确定, 但与其他以钙质超微化石和浮游有孔虫等的演替为依据的不同, 始新统底界是以碳同位素负漂为标志(Vandenberghe等, 2012; 王元青等, 2019). 新近纪的年代地层工作进展相当突出, 目前已建立了一个完整的年代地层框架, 并已被国际同行广泛接受为代表亚洲地区的核心方案(Wang等, 2013), 8个阶中已有6个建立了底界层型(邓涛等, 2019). 中国第四纪沉积类型多样, 已建立海相第四系和黄土高原第四纪黄土-古土壤序列的高精度气候地层年代学标尺. 通过^{230}Th定年, 已建立64万年来石笋记录的高精度绝对年代标尺及轨道-亚轨道尺度气候变化的高分辨率氧同位素时间序列. 对于其他第四纪陆相地层, 目前已建立地磁极性倒转控制下的第四纪年代地层学框架, 基本实现了不同沉积盆地之间以及不同沉积类型之间的区域地层对比, 今后的努力方向之一是综合多种年代学手段, 精确厘定重要动物群的年龄, 建立代表性动物群的气候地层年代学序列, 实现有精确年龄控制的生物地层框架与气候地层年代框架的有机结合(邓成龙等, 2019).

翻开历史, 可以看到中国地层学研究走过了一个不平凡的历程. 从1959年第一届全国地层会议对中国各纪地层做了第一次系统总结之后, 凭借着开展全国性区域地质调查中的岩石和生物地层工作, 中国地层学研究取得了重要的进展. 后来, 差不多每隔20年召开一次全国性的地层会议, 使中国地层学研究不断迈向新台阶. 特别是寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系等若干阶底界的GSSP的确立, 使中国地层学走向了世界前列; 在优化层型多种标志的过程中, 继续拓展层型在区域和全球的对比价值. 如果从2000年算起, 本世纪差不多又走过了近20个年头. 我们希望通过本专辑的总结, 无论是全球或区域地层的深化研究, 还是各省区开展的大比例尺地质填图工作, 都能让高精度综合地层框架成为中国地层学研究的核心领域, 为阐明深时全球重大生物和地质事件的精确发生时间、环境背景以及控制原因, 为确定生物演化的速率和重建古地理和古气候等, 奠定可靠而扎实的基础; 同时, 为祖国大地开展各种比例尺的地质填图提供一个统一的、相对精准的时间框架. 随着研究手段不断增多、改进及研究不断深化, 地层学正迎来一个新时代. 今后我们需要重视以下几个方面的工作: (1) 继续加强化石系统分类学研究, 在着力提升古生物学研究实力的基础上, 尽力提高各时期生物地层学的划分对比精度和可靠性, 在相关研究中走到世界前列. (2) 中国疆域是由不同时期诸多板块或地体组成的, 地层和沉积相发育多变, 要开展并加强高精度地质年代学、同位素地球化学地层学、磁性地层学、旋回地层学、气候地层学等的研究, 特别注重泥盆纪以后海陆相地层系列和各盆地间的对比问题. 在利用同位素地球化学地层学方法进行地层划分和对比时要注意后

期成岩作用和地方性地质变化的影响. (3) 优化各类地层学数据库的顶层设计, 做好深时地层学大数据工作, 把关古生物地层资料的准确性和可靠性, 做好定量地层学的研究工作. 同时, 利用大数据开展高精度时间框架下的古地理研究, 恢复不同时期中国主要块体在全球古地理再造中的位置及其系列演变以及各块体的精确岩相变化, 为圈定烃源岩和其他沉积矿产资源的时空分布提供重要参考, 为基础科学的深化和满足国家需求服务.

参考文献

陈军, 徐义刚. 2017. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻. 矿物岩石地球化学通报, 36: 374–393

陈均远. 2004. 动物世界的黎明. 南京: 江苏科学技术出版社. 366

陈旭, 樊隽轩, 陈清, 唐兰, 侯旭东. 2014. 论广西运动的阶段性. 中国科学: 地球科学, 44: 842–850

陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 王红岩, 聂海宽, 石学文, 文治东, 陈冬阳, 李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 中国科学: 地球科学, 47: 720–723

邓成龙, 郝青振, 郭正堂, 朱日祥. 2019. 中国第四纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 330–352

邓涛, 侯素宽, 王世骐. 2019. 中国新近纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 315–329

黄迪颖. 2019. 中国侏罗纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 227–256

郄文昆, 马学平, 徐洪河, 乔丽, 梁昆, 郭文, 宋俊俊, 陈波, 卢建峰. 2019. 中国泥盆纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 115–138

戎嘉余, 黄冰. 2014. 生物大灭绝研究三十年. 中国科学: 地球科学, 44: 377–404

戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 樊隽轩, 黄冰, 唐鹏, 李越, 张小乐, 吴荣昌, 王光旭, 魏鑫. 2019. 中国志留纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 93–114

沈树忠, 张华. 2017. 什么引起五次生物大灭绝? 科学通报, 62: 1119–1135

沈树忠, 张华, 张以春, 袁东勋, 陈波, 何卫红, 牟林, 林巍, 王文倩, 陈军, 吴琼, 曹长群, 王玥, 王向东. 2019. 中国二叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 160–193

沈树忠, 朱茂炎, 王向东, 李国祥, 曹长群, 张华. 2010. 新元古代-寒武纪与二叠-三叠纪转折时期生物和地质事件及其环境背景之比较. 中国科学: 地球科学, 40: 1228–1240

童金南, 楚道亮, 梁蕾, 舒文超, 宋海军, 宋婷, 宋虎跃, 吴玉样. 2019. 中国三叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 194–226

王成善, 胡修棉. 2005. 白垩纪世界和大洋红层. 地学前缘, 12: 11–21

王向东, 胡科毅, 郄文昆, 盛青怡, 陈波, 林巍, 要乐, 王秋来, 祁玉平, 陈吉涛, 廖卓庭, 宋俊俊. 2019. 中国石炭纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 139–159

王元青, 李茜, 白滨, 金迅, 毛方园, 孟津. 2019. 中国古近纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 289–314

席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 李罡. 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 257–288

张弥曼, 王元青, 王启飞, 王原, 卢辉楠. 2001. 热河生物群. 上海: 上海科学技术出版社. 150

张元动, 詹仁斌, 甄勇毅, 王志浩, 袁文伟, 方翔, 马譞, 张俊鹏. 2019. 中国奥陶纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 66–92

赵文金, 朱敏. 2014. 中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述. 地学前缘, 21: 185–202

周传明, 袁训来, 肖书海, 陈哲, 华洪. 2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 7–25

朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 李国祥, 张俊明, 赵方臣, Ahn Soo-Yeun, 苗兰云. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 26–65

Baresel B, Bucher H, Brosse M, Cordey F, Guodun K, Schaltegger U. 2017. Precise age for the Permian-Triassic boundary in South China from high-precision U-Pb geochronology and Bayesian age-depth modeling. Solid Earth, 8: 361–378

Becker R T, Gradstein F M, Hammer O. 2012. Chapter 22—The Devonian period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G, eds. The Geologic Time Scale. Boston: Elsevier. 559–601

Burgess S D, Bowring S A, Shen S Z. 2014. High-precision timeline for Earth's most severe extinction. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 3316–3321

Cocks L R M. 1985. The Ordovician-Silurian boundary. Episodes, 8: 98–100

Condon D, Zhu M Y, Bowring S A, Wang W, Yang A H, Jin Y G. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo formation, China. Science, 308: 95–98

Erwin D H, Laflamme M, Tweedt S M, Sperling E A, Pisani D, Peterson K J. 2011. The Cambrian conundrum: Early divergence and later ecological success in the early history of animals. Science, 334: 1091–1097

Finney S C. 2013. The reality of GSSPs. Ciências de Terra (UNL), 18: 9–12

Gingerich P D. 2006. Environment and evolution through the Paleocene-Eocene thermal maximum. Trends Ecol Evol, 21: 246–253

Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M. 2012. The Geologic

Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 1144
Isozaki Y. 2009. Illawarra reversal: The fingerprint of a superplume that triggered Pangean breakup and the end-Guadalupian (Permian) mass extinction. Gondwana Res, 15: 421–432
Kaiser S I. 2009. The Devonian/Carboniferous boundary stratotype section (La Serre, France) revisited. Newsl Stratigr, 43: 195–205
Kenrick P, Crane P R. 1997. The origin and early evolution of plants on land. Nature, 389: 33–39
Lehrmann D J, Stepchinski L, Altiner D, Orchard M J, Montgomery P, Enos P, Ellwood B B, Bowring S A, Ramezani J, Wang H, Wei J, Yu M, Griffiths J D, Minzoni M, Schaal E K, Li X, Meyer K M, Payne J L. 2015. An integrated biostratigraphy (conodonts and foraminifers) and chronostratigraphy (paleomagnetic reversals, magnetic susceptibility, elemental chemistry, carbon isotopes and geochronology) for the Permian-Upper Triassic strata of Guandao section, Nanpanjiang Basin, south China. J Asian Earth Sci, 108: 117–135
Ma X P, Gong Y M, Chen D Z, Racki G, Chen X Q, Liao W H. 2016. The Late Devonian Frasnian-Famennian Event in South China—Patterns and causes of extinctions, sea level changes, and isotope variations. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 224–244
Ovtcharova M, Bucher H, Schaltegger U, Galfetti T, Brayard A, Guex J. 2006. New Early to Middle Triassic U-Pb ages from South China: Calibration with ammonoid biochronozones and implications for the timing of the Triassic biotic recovery. Earth Planet Sci Lett, 243: 463–475
Peng S C, Babcock L E, Copper R A. 2012. The Cambrian period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G, eds. The Geologic Time Scale 2012, Vol. 1. Oxford, Amsterdam, Waltham: Elsevier. 437–488
Rong J Y, Melchin M J, Henry W S, Koren T N, Verniers J. 2008. Report of the restudy of the defined global stratotype of the base of the Silurian System. Episodes, 31: 315
Schmitz M D, Kuiper K F. 2013. High-precision geochronology. Elements, 9: 25–30
Shen S Z, Crowley J L, Wang Y, Bowring S A, Erwin D H, Sadler P M, Cao C Q, Rothman D H, Henderson C M, Ramezani J, Zhang H, Shen Y, Wang X D, Wang W, Mu L, Li W Z, Tang Y G, Liu X L, Liu L J, Zeng Y, Jiang Y F, Jin Y G. 2011. Calibrating the end-Permian mass extinction. Science, 334: 1367–1372
Shen S Z, Ramezani J, Chen J, Erwin D H, Zhang H, Xiang L, Schoepfer S D, Henderson C M, Zheng Q F, Bowring S A, Wang Y, Li X H, Wang X D, Yuan D X, Zhang Y C, Mu L, Wang J, Wu Y S. 2018. A sudden end-Permian mass extinction in South China. GSA Bull, doi: 10.1130/B31909.1
Shu D G. 2008. Cambrian explosion: Birth of tree of animals. Gondwana Res, 14: 219–240
Tong J N, Zuo J X, Chen Z Q. 2007. Early Triassic carbon isotope excursions from South China: Proxies for devastation and restoration of marine ecosystems following the end-Permian mass extinction. Geol J, 42: 371–389
Vandenberghe N, Hilgen F J, Speijer R P, Ogg J G, Gradstein F M, Hammer O, Hollis C J, Hooker J J. 2012. Chapter 28—The Paleogene Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G, eds. The Geologic Time Scale. Amsterdan: Elsevier. 855–921
Wang C S, Hu X M, Huang Y J, Wagreich M, Scott R, Hay W. 2011. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events. Sediment Geol, 235: 27–37
Wang W Q, Garbelli C, Zheng Q F, Chen J, Liu X C, Wang W, Shen S Z. 2018. Permian $^{87}Sr/^{86}Sr$ chemostratigraphy from carbonate sequences in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 500: 84–94
Wang X M, Flynn L J, Fortelius M. 2013. Fossil Mammals of Asia: Neogene Biostratigraphy and Chronology. New York: Columbia University Press. 731
Xiao S H, Narbonne G M, Zhou C M, Laflamme M, Grazhdankin D V, Moczydłowska-Vidal M, Cui H. 2016. Towards an Ediacaran time scale: Problems, protocols, and prospects. Episodes, 39: 540–555
Yu C M. 1988. Devonian-Carboniferous Boundary in Nanbiancun, Guilin, China. Beijing: Science Press. 379
Yuan X L, Chen Z, Xiao S H, Zhou C M, Hua H. 2011. An early Ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes. Nature, 470: 390–393
Zhang Q H, Wendler I, Xu X X, Willems H, Ding L. 2017. Structure and magnitude of the carbon isotope excursion during the Paleocene-Eocene thermal maximum. Gondwana Res, 46: 114–123
Zhou Z H. 2014. The Jehol Biota, an Early Cretaceous terrestrial Lagerstätte: New discoveries and implications. Nat Sci Rev, 1: 543–559
Zhu M Y, Lu M, Zhang J M, Zhao F C, Li G X, Yang A H, Zhao X, Zhao M J. 2013. Carbon isotope chemostratigraphy and sedimentary facies evolution of the Ediacaran Doushantuo Formation in western Hubei, South China. Precambrian Res, 225: 7–28
Zhu M Y, Strauss H, Shields G A. 2007. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian earth history in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 254: 1–6

(责任编委: 郑永飞)